Aclarando la cuestión

Un repaso al problema de la acidificación oceánica para aquellas personas que desean mejorar sus conocimientos respecto a esta problemática

En esta guía se tratan cuatro aspectos fundamentales. Se contestan algunas de las preguntas clave que la gente se formula sobre la acidificación oceánica. Se aclara el grado de certeza de la comunidad científica sobre los cambios que están ocurriendo en los océanos. Se discute qué le depara el futuro al océano en un mundo con altos niveles de dióxido de carbono (CO_2) y, finalmente, se exploran cuáles son las consecuencias de este fenómeno para todos nosotros.

Preguntas y Respuestas es un manual que se inspira en la guía multilingüe *Acidificación Oceánica: Los Hechos*, publicada en invierno del 2009 durante la conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en Copenhague. *Preguntas y Respuestas* tiene un carácter más técnico que *Los Hechos* y profundiza más en la base científica que sustenta las respuestas a las preguntas más frecuentes que se hace la gente.

Afrontando la cuestión de forma directa y facilitando la comprensión de estos temas tan críticos, esperamos que no solamente muchas más personas estén bien informadas en lo que respecta a la acidificación oceánica, sino que éstas actúen además con mayor consenso, ambición y urgencia, para hacer frente a uno de los problemas ambientales más significativos al que se enfrentan las presentes y futuras generaciones.

Dos años después de la Declaración de Mónaco



Photo © Palais Princier

Hace dos años fui anfitrión de una reunión de más de 150 importantes científicos marinos de 26 países, organizada y patrocinada por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental, el Comité Científico de Investigación Oceánica, el Gobierno de Mónaco y mi Fundación. Estos científicos hicieron una llamada conjunta a los responsables de toma de decisiones para que se tomaran inmediatamente medidas destinadas a reducir las emisiones de dióxido de carbono. Desde la reunión se pidió una drástica reducción para evitar que la acidificación oceánica cause daños extensos y severos a los ecosistemas marinos. Este aviso formó el núcleo de la Declaración de Mónaco, a la que me complací en apoyar plenamente.

Dos años después, equipos científicos de todo el mundo han llevado a cabo relevantes trabajos sobre acidificación oceánica. A veces, los resultados de este trabajo no han corroborado predicciones precoces sobre los impactos de la acidificación oceánica, pero la mayor parte de lo que hemos aprendido desde la Declaración de Mónaco aumenta sustancialmente nuestra preocupación sobre la velocidad y potencial alcance del impacto que nuestras emisiones de dióxido de carbono tendrán sobre el océano y a su vez sobre nosotros.

Estoy encantado de que mi Fundación de soporte a *Acidificación Oceánica: Preguntas y Respuestas*. Una vez más, la ciencia mundial se ha reunido, esta vez junto con el Grupo de Usuarios de Referencia sobre Acidificación oceánica, para abordar un nuevo tema- el de la incertidumbre y la información errónea sobre la acidificación oceánica.

Estoy convencido de que con estas aclaraciones y respuestas a las nuevas preguntas que han surgido, este trabajo ayudará a desbloquear decisiones y a superar las barreras que se interponen entre nosotros y un progreso más rápido en hacer frente al problema de la acidificación oceánica.

HSH Príncipe Alberto II de Mónaco

Puesta en escena

Desde el final de la primera Revolución Industrial en los años 1830s, la quema indiscriminada de combustibles fósiles, la deforestación y la producción de cemento han emitido a la atmósfera más de 440000 millones de toneladas de CO_2 (la mitad de ellos durante los últimos 30 años). Esta liberación masiva de carbono fijado geológicamente provoca una intensificación del efecto invernadero natural y pone en peligro la estabilidad futura del clima del planeta. Afortunadamente para nosotros, al menos una tercera parte de este CO_2 emitido ha sido asimilado por la cobertura vegetal y absorbido por el océano, lo que ha reducido hasta la fecha la tasa y la extensión de los impactos del cambio climático, pero con otras consecuencias asociadas, especialmente para el océano.

Vista de un arrecife de coral de aguas frías a 220 m de profundidad desde el submarino de investigación JAGO.



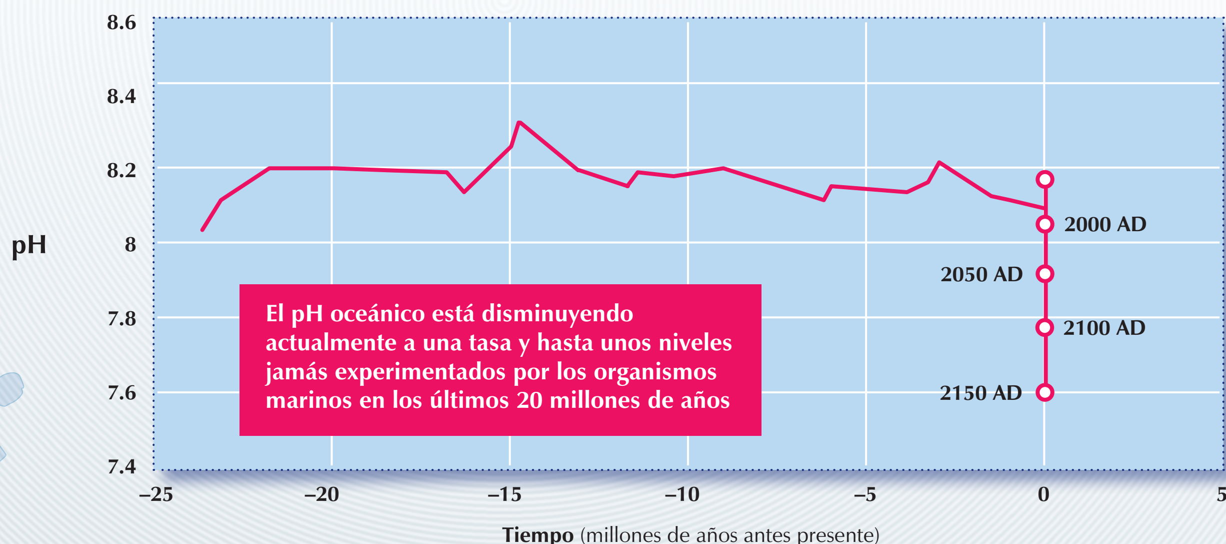
Photo © Karen Hissmann, IFM-GEOMAR

El 'otro problema del CO_2'

Cuando el CO_2 emitido a la atmósfera se disuelve en el agua de mar, tienen lugar una serie de reacciones químicas que resultan en el proceso conocido como la acidificación oceánica, también denominado 'el otro problema del CO_2' o 'el gemelo malvado del cambio climático'. La acidificación oceánica es un problema detectado recientemente, aunque sus implicaciones podrían llegar a ser tan importantes como las asociadas con el calentamiento global. De hecho, mientras éste último resulta un tanto elusivo y es difícil de monitorizar, la acidificación oceánica puede ser cuantificada, es predecible y es progresiva. Algunos estudios recientes muestran que la captación actual de CO_2 por parte del océano superficial – y su consiguiente tasa de acidificación – ocurre unas 100 veces más rápidamente que durante el final de la última glaciación (hace 20000 años), que fue el último momento en el cual el CO_2 aumentó de forma significativa.

Los océanos se están acidificando rápidamente

Cambios en el pH oceánico durante los últimos 25 millones de años.
Source after Turley *et al.*, in *Avoiding Dangerous Climate Change* (2006).



Resolviendo la confusión, aportando claridad

La acidificación oceánica se consideró por primera vez como un tema de gran importancia en el año 2005, con la publicación del informe de Royal Society. Aunque ya existían referencias sobre esta problemática en la literatura, incluso desde los años 70, éstas aumentaron en número desde unos diez años antes de publicarse dicho informe. Desde el año 2005, diversos proyectos de investigación alrededor del mundo estudian este problema y, aunque todavía existen muchos interrogantes, hay un considerable consenso científico en que la acidificación oceánica es un hecho real y supone una amenaza importante para nuestro estilo de vida. Por ejemplo, la Declaración sobre la Acidificación Oceánica del Panel Inter-Académico de Asuntos Internacionales afirma que 'aún con la estabilización del CO_2 atmosférico en 450 ppmv[1], la acidificación oceánica tendrá impactos trascendentales en muchos ecosistemas marinos. Se necesita una reducción rápida de al menos el 50% de las emisiones globales de CO_2 para el año 2050'.

Uno de los desafíos a la hora de divulgar un tema como la acidificación oceánica es que muchas personas encuentran la ciencia involucrada compleja y confusa - algo que debe ser resuelto rápidamente. Esto es necesario para poder actuar con la ambición colectiva y la urgencia necesaria para reducir drásticamente las emisiones de CO_2 y mitigar así los cambios en el océano provocados por la acidificación. Con objeto de contribuir a este propósito, en invierno del año 2009 e inmediatamente después de la conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en Copenhague, 27 científicos de 19 instituciones y cinco países se organizaron para proporcionar información y respuesta a muchas de las preguntas frecuentes que hoy en día comienzan a ser contestadas respecto a la acidificación oceánica.[2] Este análisis y discusión forman la base de esta nueva guía.

Las aguas del Antártico son una de las zonas donde los cambios en el pH del océano están ocurriendo más rápidamente.



Photo © John M Baxter

Incluso con la estabilización del CO_2 atmosférico en 450 ppmv, la acidificación oceánica tendrá fuertes impactos en muchos ecosistemas marinos

1. ppmv son partes por millón de volumen (una parte por millón de volumen equivale al volumen de un gas mezclado en un millón de volúmenes de aire)

2. Trabajo del programa U.S. Ocean Carbon and Biogeochemistry (OCB; www.us-ocb.org), financiado por el European Project on Ocean Acidification (EPOCA; http://www.epoca-project.eu/) y el UK Ocean Acidification Research Programme (http://www.oceanacidification.org.uk). Científicos reconocidos en temas de acidificación oceánica respondieron una lista de 39 preguntas frecuentes (FAQs) que fueron sometidas a un proceso abierto de revisión.

Principales estudios en curso o en etapas avanzadas de planificación

UNION EUROPEA

La Comisión Europea ha financiado el Proyecto Europeo sobre Acidificación Oceánica (EPOCA), una iniciativa para investigar 'la acidificación oceánica y sus consecuencias', como un esfuerzo multinacional que incluye 31 instituciones asociadas situadas en diez países europeos. La investigación de EPOCA, todavía en marcha, pretende monitorizar la acidificación oceánica y sus efectos en los organismos y los ecosistemas marinos, para identificar los riesgos de una acidificación continuada, y para entender cómo esos cambios afectarán el sistema de la Tierra en su conjunto. Un nuevo proyecto 'Acidificación del Mar Mediterráneo bajo un clima cambiante' (MedSeA) tendrá como objetivo específico la acidificación oceánica en el Mediterráneo y se iniciará en breve.

ALEMANIA

Impactos Biológicos de la Acidificación Oceánica (BIOACID). Este proyecto coordinado que incluye 18 instituciones investigadoras fue financiado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación (BMBF) para un período inicial de 3 años que comenzaba en Setiembre de 2009. Se centra principalmente en los efectos de la acidificación oceánica sobre la biota marina desde el nivel subcelular hasta el de ecosistema y sus impactos potenciales sobre los recursos naturales y los feedbacks bigeoquímicos.

CHINA

El Ministerio de Ciencia y Tecnología (MOST) y la Fundación Nacional de Ciencia de China (NSFC) han empezado a dar soporte a la investigación sobre acidificación oceánica. CHOICE-C es un nuevo proyecto con financiación durante 5 años para estudiar cuestiones como los altos niveles de CO_2 y la acidificación en los mares marginales de China, llevado a cabo conjuntamente por siete importantes instituciones con una financiación de 34 millones de RMB. El NSFC empezó a financiar proyectos sobre acidificación oceánica en 2006 y existen varios proyectos en marcha a nivel nacional que investigan los impactos de la acidificación sobre los organismos calcificadores.

REPÚBLICA DE COREA (Corea del Sur)

La Fundación de Ciencia e Ingeniería de Corea ha subvencionadurante 5 años el Proyecto Mesocosmos Corea, que implica cinco laboratorios coreanos, para examinar los efectos de CO_2 y temperatura elevados sobre comunidades naturales de fitoplancton.

JAPÓN

Cinco grandes programas financian investigación sobre acidificación oceánica en Japón. El Ministerio de Medio Ambiente de Japón apoya programas de investigación para aclarar el impacto futuro de la acidificación sobre diversos organismos marinos por medio de unas sofisticadas instalaciones de mesocosmos (e.g. AICAL, Acidification Impact on CALcifiers). El MEXT (Ministerio de Educación, Ciencia, Deporte y Cultura) y el JAMSTEC (Agencia Japonesa para la Ciencia Marina y Tecnología) también apoyan investigaciones sobre acidificación tales como los esfuerzos para modelizar las condiciones futuras del océano mediante el superordenador Simulador de la Tierra.

REINA UNIDO (UK)

Entre 2004-2007 se llevó a cabo un estudio sobre la Incidencia del CO_2 en el Medio Marino (IMCO$_2$), financiado por los Departamentos del Gobierno Defra (Departamento de Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales) y DTI. En primavera del 2009, el Reino Unido anunció un programa de 5 años financiado con 12 millones de libras para investigar los cambios de los ecosistemas oceánicos en respuesta a la acidificación oceánica: www.oceanacidification.org.uk (costes compartidos entre el Consejo de Investigación del Medio Natural, el Defra y el Departamento de Energía y Cambio Climático (DECC). El programa incluye 21 instituciones de investigación en todo el Reino Unido y colabora con EPOCA y BIOACID.

ESTADOS UNIDOS (EEUU)

La Ley Federal sobre la Investigación y la Supervisión de la Acidificación Oceánica de 2009 (FOARAM). La Ley FOARAM en La Ley Pública 111-11 de los EEUU fue firmada por el presidente Obama en marzo de 2009. De acuerdo con esta ley, la Administración Nacional del Océano y de la Atmosfera (NOAA), la Fundación Nacional de Ciencia, y otras agencias trabajan conjuntamente con el Grupo de Trabajo sobre Acidificación Oceánica del Panel Asesor sobre Investigación y Recursos Oceánicos (ORRAP) para desarrollar un programa nacional sobre acidificación oceánica. Desde este año, el Grupo de Trabajo Interinstitucional sobre Acidificación Oceánica ha estado recopilando y agrupando los resultados de estos grupos para desarrollar un programa nacional de control, investigación y evaluación de consecuencias de la acidificación oceánica, y de estrategias de conservación, que se presentará al Congreso en marzo de 2011. Varias de las agencias han empezado ya a financiar parte de la investigación sobre acidificación oceánica, su monitorización, y las actividades de divulgación que se indican en la Ley FOARAM.

AUSTRALIA

La acidificación oceánica en Australia se concentra en las regiones de la Antártida y de Australasia. El Centro Cooperativo de Investigación del Clima y los Ecosistemas Antárticos [una asociación del AAD, la Universidad de Tasmania, el CSIRO, el DCCEE, el NIWA (Nueva Zelanda) y el AWI (Alemania)] patrocina investigación sobre el seguimiento de los cambios en la química del agua y las respuestas de especies clave en el Océano Antártico. En los trópicos,el CSIRO, la NOAA (USA), el NIES (Japón) y la Universidad de Queensland han comenzado un programa colaborativo de observación y modelización en las regiones de la Gran Barrera de Coral y del Pacífico Sur. La vulnerabilidad de la Gran Barrera de Coral a la acidificación oceánica también está siendo estudiada por el Instituto Australiano de Ciencia Marina y diversas universidades (La Universidad Nacional de Australia, la Universidad de Queensland, la Universidad de Sydney, y la Universidad James Cook) a través de un seguimiento a gran escala de las aguas del arrecife, la reconstrucción paleontológica de testigos de corales, y experimentos de campo y de laboratorio sobre organismos del arrecife.

Yendo al grano con los hechos

Para muchas personas que oyen hablar de la acidificación oceánica por primera vez, las primeras preguntas que se formulan son - ¿Qué es? y ¿Ocurre de verdad?

Esta reacción es comprensible en el contexto de una ausencia habitual de familiaridad con el océano, de una serie de perspectivas confusas sobre si el cambio climático es real o no, y de una inevitable sorpresa de que exista otro gran problema relacionado con el cambio climático del que se empieza a hablar desde hace tan poco tiempo.

La primera reacción de la mayoría de la gente es pensar que, sea lo que sea la acidificación oceánica, no puede ser ni más ni menos real que el cambio climático y, en el fondo, no debe de ser tan diferente. Así que se asocia directamente con este problema y con sus idas y venidas en los periódicos. La gente tiene demasiadas preocupaciones en su día a día y, dado que este asunto les resulta distante, simplemente continúan con sus vidas. Permanecen ajenos al hecho de que, mientras que algunos aspectos del cambio climático son difíciles de cuantificar, los conceptos básicos sobre la acidificación oceánica y la manifestación actual de este fenómeno están bien definidos.

¿Qué es la acidificación oceánica?

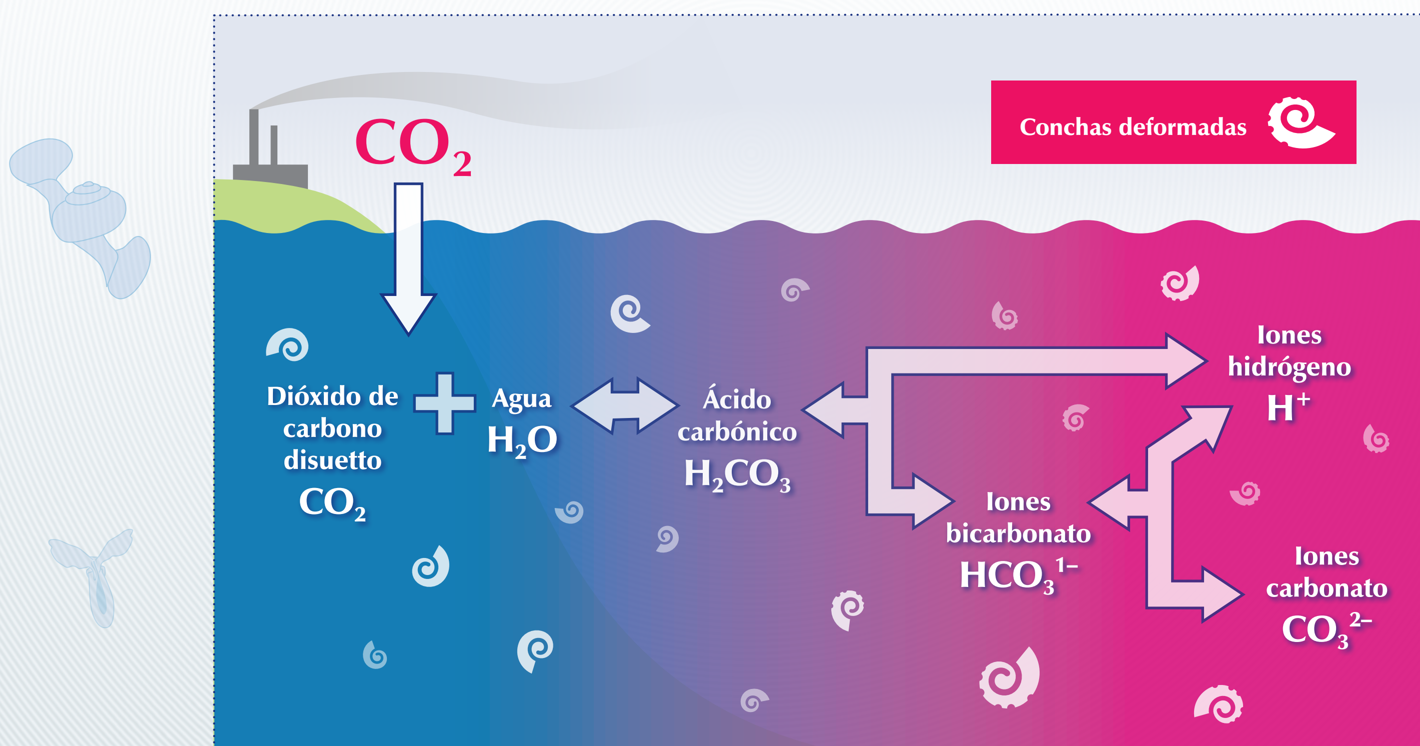
El cambio del medio marino hacia unas condiciones más ácidas (o menos básicas) se debe al incremento de la cantidad de CO_2 en la atmósfera. Esto se conoce como acidificación oceánica y ocurre cuando este CO_2 reacciona con el agua de mar, al ser captado por el océano, produciendo un compuesto ácido. Cuanto más rápido aumente el contenido en CO_2 de la atmosfera, más rápida e intensa será la acidificación del océano.

Entendiendo los conceptos 'carbonato' y 'acidez'

La acidificación oceánica es muy distinta del cambio climático. El cambio climático representa un conjunto mucho más amplio de consecuencias para las actividades humanas, afectando a diferentes procesos cuya frecuencia, escala y efectos varían desde niveles predecibles hasta algunos altamente inciertos. La acidificación oceánica es el efecto del CO_2 en el océano una vez que es absorbido por el agua de mar. Es decir, el término 'acidificación oceánica' engloba distintos procesos que tienen lugar cuando el dióxido de carbono reacciona con el agua de mar. De entre todos ellos, cabe destacar dos reacciones importantes. Primeramente, la formación de ácido carbónico, con la consiguiente liberación de iones hidrógeno:



La quema de combustibles fósiles provoca un aumento del CO_2 en la atmósfera que es captado por el océano y hace que éste se vuelva más ácido. Source University of Maryland.



La escala de pH

La escala de pH es una manera de cuantificar cuán ácida o básica (alcalina) es una solución. Se concibió en el año 1909 y es un índice logarítmico de la concentración de iones hidrógeno en una solución acuosa. La escala debe leerse de manera inversa, de forma que los valores de pH decrecen cuando aumentan los niveles de iones hidrógeno. El agua pura tiene un pH de 7; los valores situados por debajo de este valor se consideran ácidos; los situados por encima, básicos. Una solución de pH 4 es diez veces más ácida que una de pH 5, y cien veces más ácida que una de pH 6. Hoy en día el agua de mar tiene en promedio un pH de 8,1, de forma que debe ser considerada como una base débil. A pesar de que el rango de la escala de pH se delimita normalmente entre 0 y 14, valores mayores y menores de este rango son teóricamente posibles

pH	
0	Ácido de batería
1	Ácido clorhídrico
2	Zumo de limón
3	Cerveza, vinagre
4	Vino, tomates
5	Café negro
6	Orina, leche
7	Agua pura, sangre
8	**Agua de mar**
9	Bicarbonato sódico
10	Leche de magnesia
11	Amoníaco para el hogar
12	Lejía para el hogar
13	Limpiador para el horno
14	Hidróxido sódico

En esta reacción, la liberación de iones hidrógeno incrementa la acidez, reduciendo el pH (ver Caja más adelante). Posteriormente se produce una segunda reacción, entre los iones carbonato, el dióxido de carbono y el agua, que produce iones bicarbonato:



$$CO_2 \text{ (dióxido de carbono)} + H_2O \text{ (agua)} + CO_3^{2-} \text{ (iones carbonato)} \leftrightarrow 2HCO_3^{-} \text{ (iones bicarbonato)}$$

El efecto combinado de estas reacciones no solamente aumenta la acidez sino que además reduce la disponibilidad de iones carbonato. Estos iones son necesarios para el proceso de calcificación, mediante el cual se producen las conchas y esqueletos calcáreos de muchos organismos. Esta reducción de la disponibilidad de carbonato conlleva un gran impacto biológico, ya que puede afectar la tasa con la que organismos marinos – como corales, moluscos, crustáceos, erizos de mar y algunas algas – construyen sus caparazones y esqueletos calcáreos. En condiciones de menor pH (mayor acidez), los iones carbonato están menos disponibles, lo que dificulta el proceso de calcificación e incluso puede llegar a interrumpirlo por completo. Este impacto podría llegar a tener consecuencias potencialmente catastróficas para la vida marina y para muchas especies de importancia económica.

Experimento en que se investiga el efecto de la acidificación oceánica y de temperaturas elevadas sobre algas coralinas.



Photo ©Sophie Martin (CNRS)

El concepto de 'acidificación'

El océano tiene actualmente un pH superior a 7,0 de manera que es 'básico' y resulta prácticamente imposible que, químicamente y en su totalidad, se convierta en 'ácido'. Por tanto, ¿por qué utilizamos el término de 'acidificación oceánica'? Esto se debe a que la acidificación se refiere a la dirección del proceso, independientemente del valor de partida. Se usa el mismo término, por ejemplo, en la elaboración del vino, la química sanguínea o el estudio de suelos, para referirse al aumento de la acidez, con independencia de si las condiciones iniciales son ácidas o básicas. En comparación con los términos que utilizamos para describir los cambios de temperatura, un incremento de 0° C a 5° C podría considerarse igualmente frío (para la mayoría de nosotros) a pesar de que, técnicamente, se trata de un 'calentamiento'.

Varios factores pueden influenciar de manera local las principales reacciones químicas del CO_2 con el agua de mar y sumarse a los efectos de la acidificación oceánica. Por ejemplo, en las zonas costeras puede precipitar lluvia ácida, que contiene ácido sulfúrico y nítrico derivados de la quema de combustibles fósiles. Esta lluvia puede tener un pH entre 1 y 6. Su impacto puede tener importancia a escala local y regional, pero es insignificante a nivel global. Las aguas costeras también se ven afectadas por el exceso de aporte de nutrientes, principalmente nitrógeno, procedentes de la agricultura, los fertilizantes y las aguas residuales. La eutrofización resultante promueve grandes proliferaciones de plancton, que cuando se colapsan y sedimentan al fondo del mar, estimulan la acción bacteriana sobre toda esta materia y provocan un descenso del oxigeno disuelto en el agua de mar y un incremento del CO_2 (que reduce el pH).

¿Qué seguridad tenemos de que la acidificación oceánica está ocurriendo realmente?

Un alto grado de certeza

Existe un alto grado de certidumbre de que la química marina está cambiando debido al aumento de los niveles atmosféricos de CO_2, y de que la actividad humana es la responsable de ello.

La evidencia más clara proviene de mediciones precisas efectuadas en distintas partes del mundo; por ejemplo, el registro de los últimos 20 años en el Pacífico (cerca de Hawai), como se muestra arriba. Aunque existe una variabilidad estacional muy marcada, se observa una tendencia clara de aumento del CO_2 disuelto en la capa superior del océano y un consiguiente descenso del pH asociado. Estas tendencias están íntimamente relacionadas con los cambios en el CO_2 atmosférico. Como la escala de pH es logarítmica, el cambio observado de pH puede parecer muy pequeño, ya que se trata de 0.1 unidades desde la era preindustrial, pero en realidad representa un aumento del 30% en la concentración de iones hidrógeno.

Las simulaciones realizadas mediante modelos informáticos que tienen en cuenta las recientes emisiones antropogénicas de CO_2, concuerdan con las observaciones hechas del descenso del pH y de las concentraciones de carbonato en el agua de mar (véase la figura de arriba). No existe ninguna otra causa que pueda ser responsable de estos efectos observados a escala global.

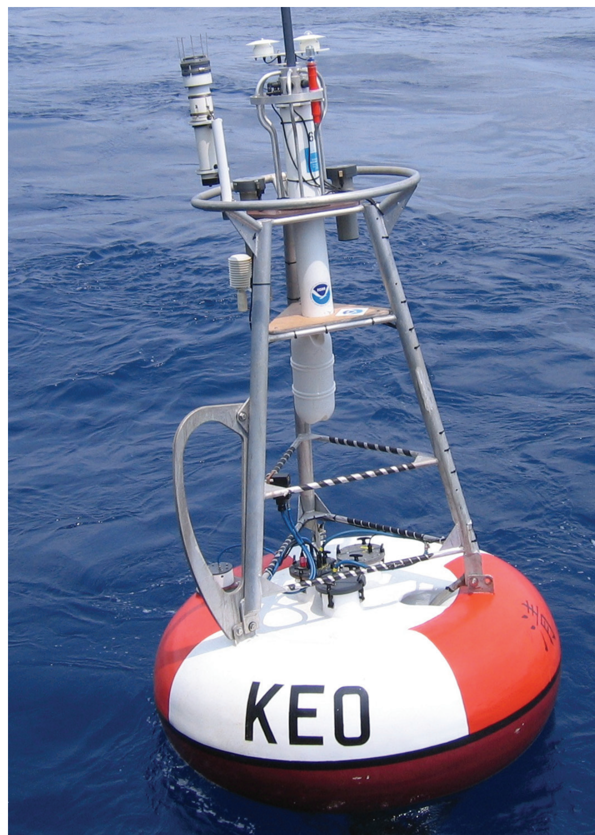
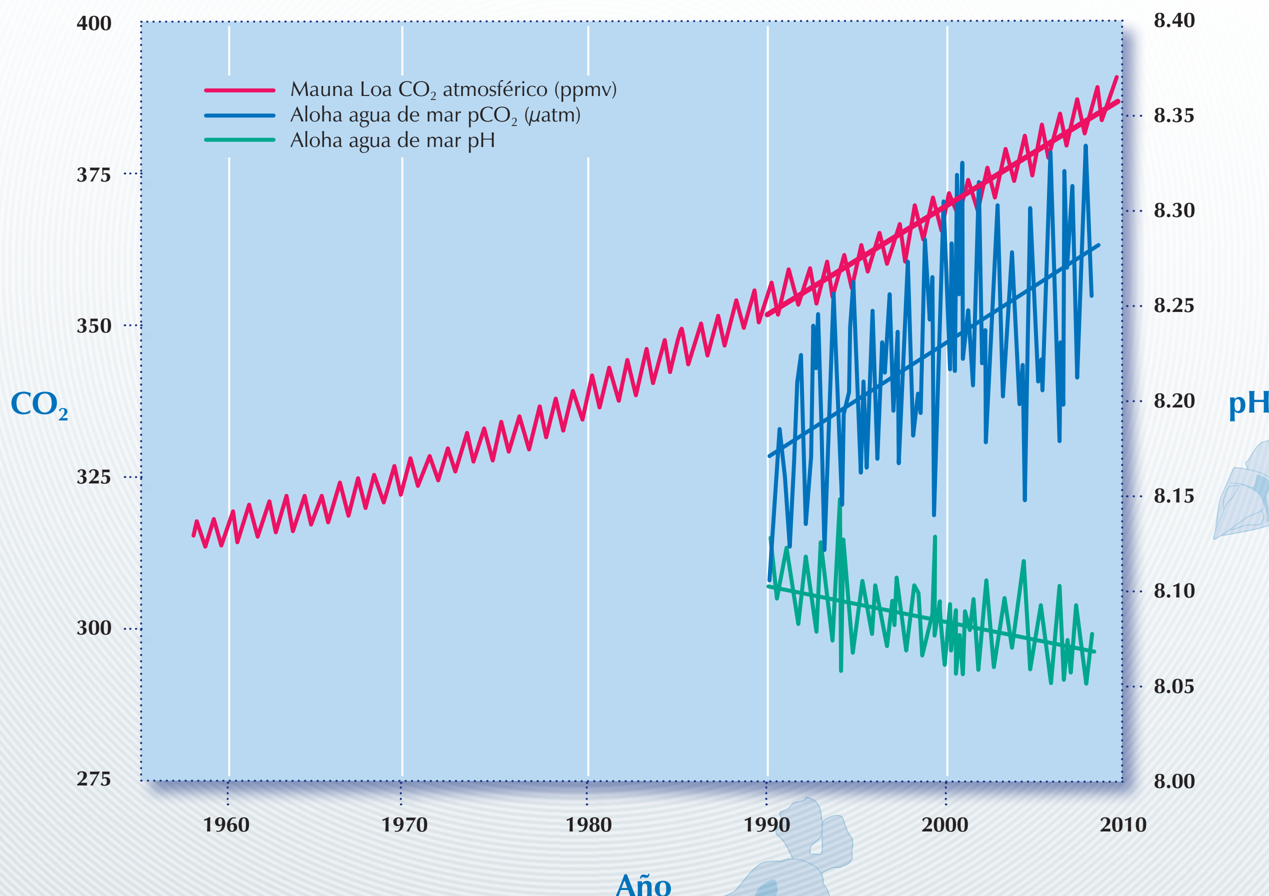


Photo © Christopher Sabine

Fondeo de la NOAA en el Pacífico utilizado para medir flujos de CO_2.

Serie temporal de registros de CO_2 atmosférico en Mauna Loa, y de pH y pCO_2 superficiales en la estación Aloha del Océano Pacífico. Source after Feely *et al.*, *Oceanography* (2009).



Distintos océanos, diferentes velocidades de cambio

Aunque la acidificación oceánica ocurrirá de manera global, ésta se producirá de forma más intensa y rápida en algunas regiones del océano que en otras, y sus impactos también variarán debido a diferencias en la temperatura o en los patrones de circulación. Los niveles de carbonato en el agua de mar, que actualmente son suficientemente altos como para mantener intactas las estructuras calcáreas (condiciones de 'supersaturación') pueden llegar a alcanzar niveles tan bajos como para que estas estructuras duras empiecen a disolverse (condiciones de 'subsaturación'). Las predicciones basadas en modelos indican que el Océano Ártico será el primero en sobrepasar este umbral químico, cuando sus aguas cambien de un estado de 'supersaturación' a otro de 'subsaturación' respecto al carbonato cálcico.

Si los niveles atmosféricos (y oceánicos) de CO_2 continúan aumentando al ritmo actual, se estima que en el año 2018 alrededor del 10% del Océano Ártico habrá cruzado este umbral, proporción que alcanzaría el 50% en el año 2050. En el año 2100 es probable que todo el Océano Ártico haya alcanzando un estado capaz de provocar la disolución de las estructuras carbonatadas más desprotegidas.

Existe una gran certeza de que la química del agua de mar está cambiando debido al aumento del CO_2 atmosférico, y de que las actividades humanas son su causa de fondo.



Photo © Ulf Riebesell, IFM-GEOMAR

Personal del proyecto EPOCA trabajando en un mesocosmos durante un experimento de manipulación de CO_2 en el Ártico cerca de Svalbard.



Photo © Jean-Pierre Gattuso

Los experimentos con mesocosmos son vitales para ayudarnos a comprender las implicaciones de la acidificación oceánica a nivel de comunidades y de ecosistemas.

pH medio decadal de la superfície del mar para 1875, 1995, 2050 y 2095, modelado a partir del Modelo Comunitario del Sistema Climático 3.1 (CCSM3) del Centro Nacional para la Investigación Atmosférica.
Source after Feely *et al.*, *Oceanography* (2009).

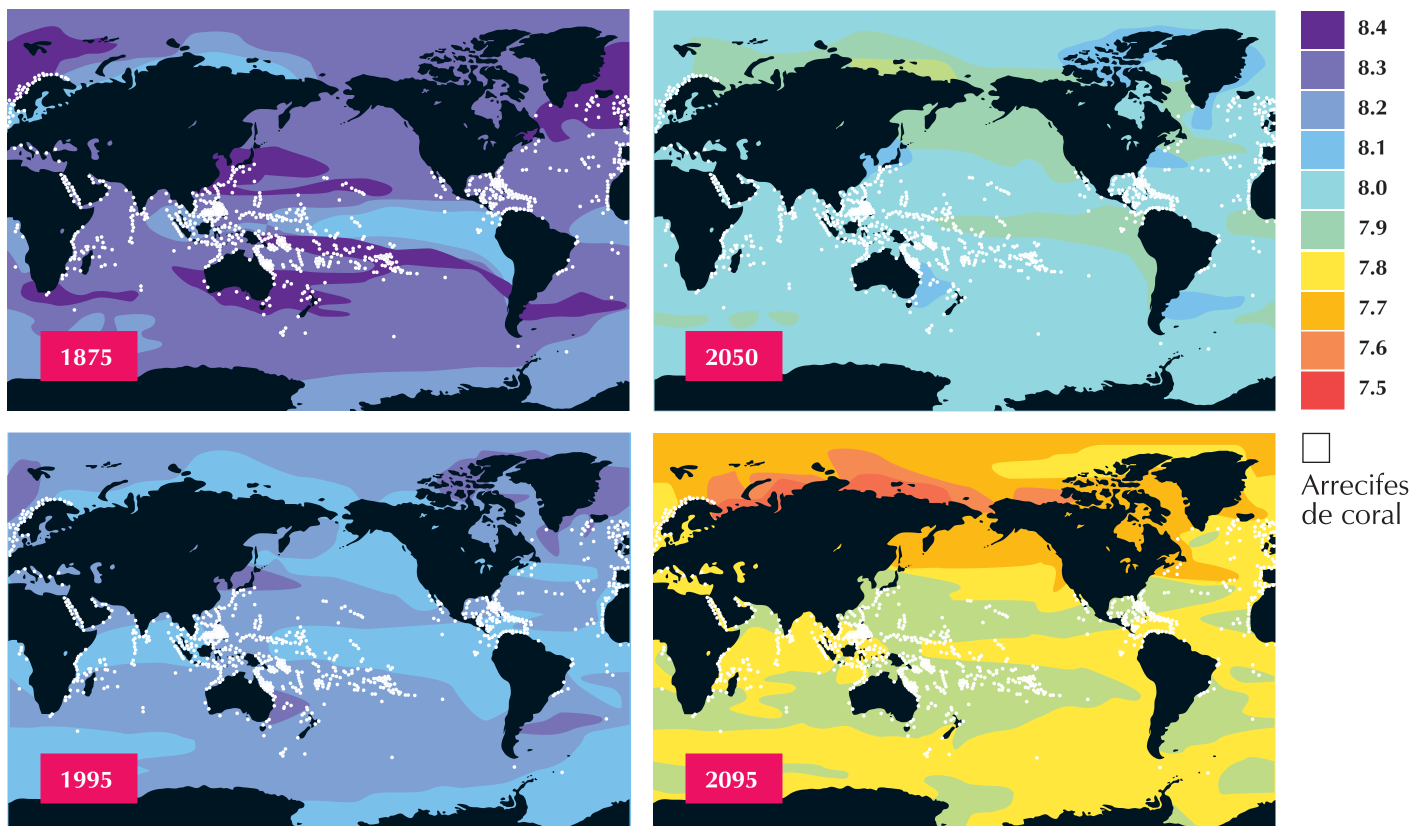


Photo © MNCR/SNH



El erizo de mar común *Echinus esculentus* tiene un caparazón hecho de calcita.

Calcita y aragonita

La calcita y la aragonita son dos formas distintas de carbonato cálcico. La calcita es la forma mineral típica de las conchas de los cocolitofóridos (algas planctónicas), los foraminíferos (protistas ameboides), los equinodermos y algunos moluscos (por ejemplo, ostras); es relativamente menos soluble que la aragonita.

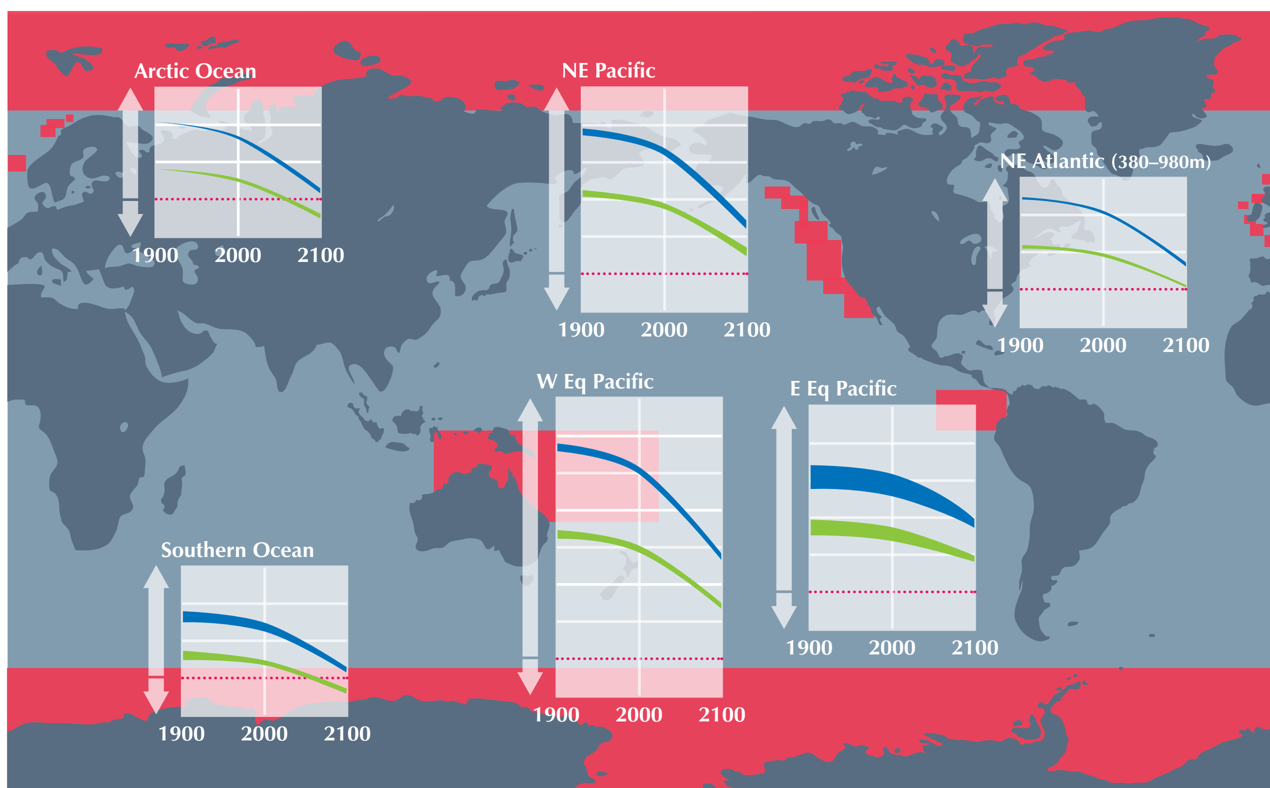
La aragonita es una forma más soluble de carbonato cálcico; se encuentra en corales, en la mayoría de moluscos (incluyendo pterópodos libres (pequeños caracoles planctónicos)), así como en algunas especies de algas.

Photo © Hopcroft/UAF/CoML



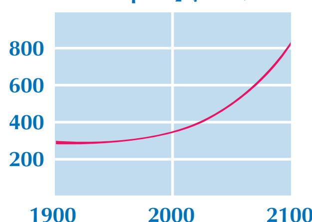
El pterópodo *Cuvierina columnella* tiene una concha de aragonita.

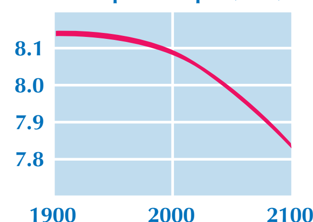
Cambios históricos estimados de la química marina y sus proyecciones futuras, asumiendo que continúa el escenario actual de emisiones de CO_2. En el mapa se indica el estado de saturación del carbonato para seis regiones ilustrativas (sombreadas en rojo)- los valores por encima de la línea de puntos roja representan condiciones de sobresaturación, y los situados por debajo de subsaturación, tanto para la calcita como para la aragonita. El espesor de las líneas de saturación indica su rango estacional. Los promedios superficiales globales de pCO_2 atmosférica, pH y de saturación de calcita y aragonita se muestran abajo a la derecha.
Source after Turley *et al., Marine Pollution Bulletin* (2010).

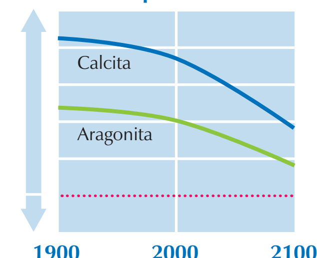


Calcita

Aragonita







Horizontes de saturación

Las aguas oceánicas frías y profundas suelen encontrarse generalmente en condiciones subsaturadas con respecto al carbonato, lo que provoca la disolución de las conchas de los organismos calcificadores. Por el contrario, las aguas superficiales se encuentran normalmente supersaturadas de iones carbonato, lo que por tanto estabiliza las estructuras carbonatadas. El límite entre ambas condiciones se conoce como el horizonte de saturación, por debajo del cual el carbonato cálcico se disuelve significativamente. Algunos organismos pueden sobrevivir por debajo de este límite a través de determinados mecanismos protectores de sus estructuras calcáreas. Dado que la acidificación oceánica provoca una migración de estos horizontes hacia zonas menos profundas de la columna de agua, se espera que, con el tiempo, más y más organismos se vean expuestos a condiciones de subsaturación, y se comprometa su viabilidad. El horizonte de saturación de la calcita se encuentra a una profundidad mucho mayor que el de la aragonita, pero ambos ya se han desplazado hacia niveles considerablemente más cercanos a la superficie, entre 50 y 200 m, en comparación con los niveles en los que se encontraban a comienzos de los años 1800s.

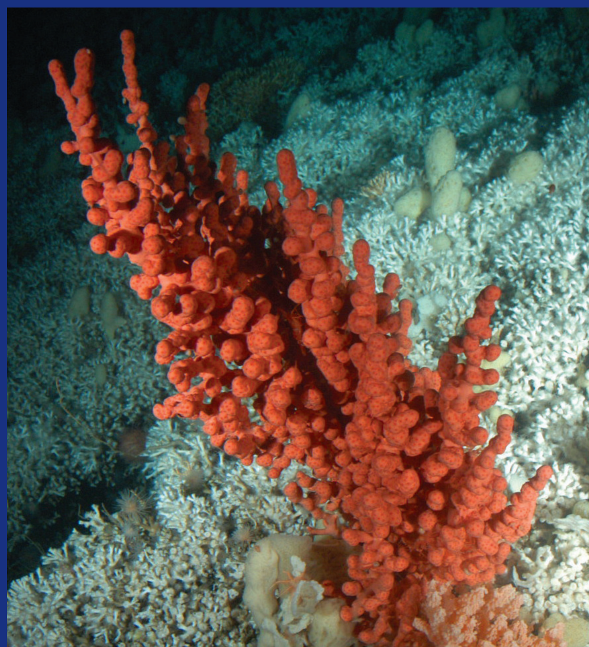


Photo © Karen Hissmann, IFM-GEOMAR

Los corales escleractínidos como Lophelia pertusa (coral blanco) construyen sus esqueletos de aragonita y son especialmente vulnerables a un horizonte de saturación ascendente. Las gorgonias (coral rojo) construyen sus esqueletos de calcita.

Acidificación oceánica y el destino a corto y largo plazo del carbono en el sistema

A escalas de tiempo largas (>100000 años) existe un balance natural entre la captación y la liberación de CO_2 en la Tierra; el CO_2 liberado por los volcanes, la fuente natural más importante de este gas, es asimilado por las plantas para la producción de materia orgánica y es captado por la meteorización de las rocas. No obstante, la meteorización de las rocas tiene lugar durante decenas de miles de años, de forma que no puede retener, de forma suficientemente rápida, todo el CO_2 antropogénico liberado a la atmósfera y al océano. A escalas de tiempo más cortas (>1000 años), el océano dispone de un mecanismo interno estabilizador de retroalimentación, conocido como la compensación de carbonatos, que conecta el ciclo del carbono en el océano con los carbonatos almacenados en los sedimentos del fondo del mar.

Las capas más superficiales del océano tienden a estar supersaturadas en $CaCO_3$, de forma que tiene lugar muy poca disolución, mientras que el océano profundo está subsaturado, con lo que el carbonato se disuelve rápidamente. El primer límite entre estos dos estados se conoce como lisoclina, a partir de la cual la disolución se incrementa considerablemente al aumentar la profundidad. El $CaCO_3$ en forma de restos de conchas de organismos muertos desciende por la columna de agua hasta el fondo; En zonas poco profundas, la mayor parte permanece atrapado en el sedimento durante largos periodos de tiempo, pero cuando las conchas precipitan en zonas profundas, casi todo el $CaCO_3$ se disuelve, de forma que este carbono no queda inmovilizado durante millones de años.

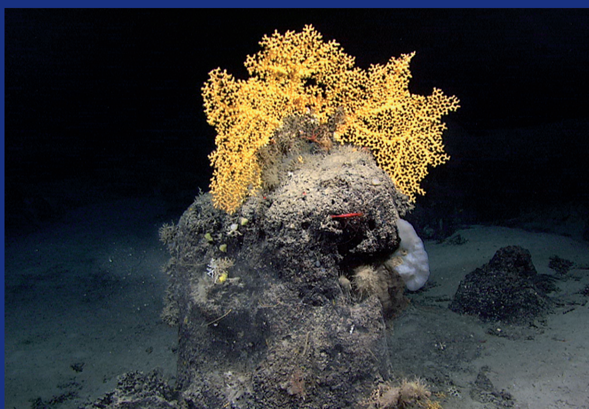


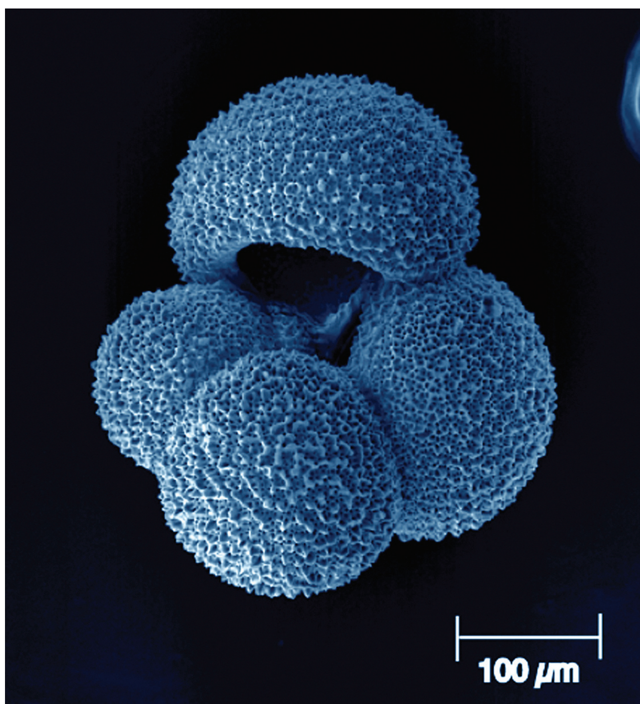
Photo © Deep Atlantic Stepping Stones Science Team IFE URI/NOAA

Los sedimentos del lecho marino pueden actuar como un sumidero de carbonato cálcico.

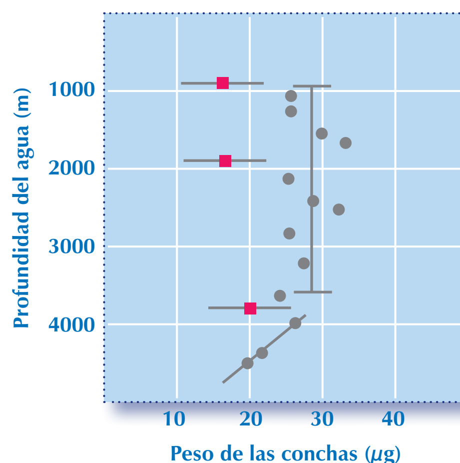
El aumento actual de la tasa de disolución de CO_2 atmosférico en el océano está provocando un desequilibrio entre la profundidad de compensación del carbonato (CCD), y la profundidad a la cual todo el carbonato se disuelve. A medida que el pH disminuye, se produce un ascenso de la lisoclina y la CCD hacia zonas menos profundas, con lo que se exponen las cochas atrapadas en los sedimentos a condiciones subsaturadas y se provoca su disolución, algo que contribuirá a la amortiguación de la acidificación, aunque a largas escalas de tiempo de miles de años.

El foraminífero planctónico *Globigerina bulloides*, recogido en una trampa de sedimento situada en aguas sub-Antárticas, tiene una concha de calcita.

Photo © Andrew Moy



de CO_2, la pérdida de peso observada en las conchas de foraminíferos como *Globigerina bulloides* y otras especies planctónicas propias de aguas polares, como los pterópodos, cuyas conchas están formadas de aragonita, la forma más soluble de $CaCO_3$, es motivo de preocupación. Los pterópodos juegan un papel muy importante en las cadenas tróficas antárticas, donde constituyen el alimento principal de muchos otros organismos, incluyendo peces; además, contribuyen al almacenamiento de carbono durante largos periodos de tiempo, bien de forma directa, cuando sus esqueletos se depositan en el fondo, o indirectamente, al actuar sus conchas como lastre para el transporte de carbono orgánico procedente de animales muertos hacia el fondo del océano.



Los pesos promedio de conchas de *Globigerina bulloides* (300-355μm) recogidas en diferentes profundidades por encima del horizonte de saturación de calcita (cuadrados rojos) son menores en comparación con los de conchas obtenidas a partir de testigos de sedimento de la era pre-industrial (círculos grises).
Source after Moy *et al., Nature Geoscience* (2009).

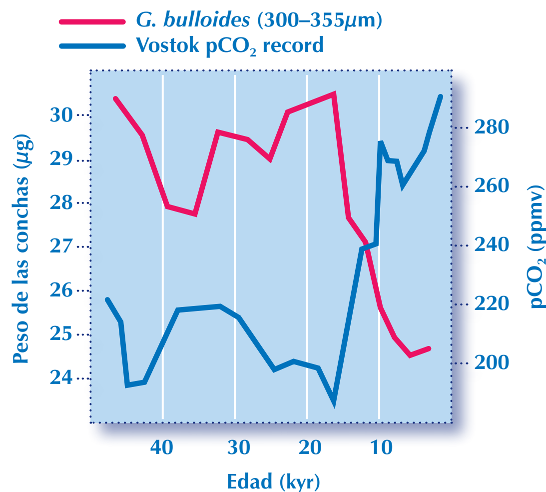
¿Latitudes más altas, plancton más ligero?

Se prevé que la subsaturación de la aragonita empezará a tener lugar en las aguas del Océano Austral entre los años 2030 y 2070. Experimentos de laboratorio y observaciones directas apuntan a que, ya antes de que se alcancen estos niveles, el descenso de las concentraciones de carbonato dificultará la producción y el mantenimiento de las estructuras calcáreas de los organismos marinos. Muestras tomadas en este Océano revelan que, actualmente, las conchas secretadas por los foraminíferos planctónicos son ya entre un 30 y un 35% más ligeras que las producidas por los mismos organismos en la época preindustrial. En un escenario en el que continúen incrementándose las emisiones

Un pterópodo *Limacina helicina antarctica* vivo recogido a bordo del buque de investigación Umitaka Maru durante la expedición del Censo Marino Colaborativo del Antártico Este (CEAMARC) del Año Polar Internacional 2008 (IPY).

Photo © Hopcroft/ UAF/COML





Los pesos de las conchas de *Globigerina bulloides* eran mayores cuando los niveles de CO_2 atmosférico eran más bajos (hace unos 18000 años) y son los más bajos ahora, cuando los niveles de CO_2 están en su máximo.
Source after Moy *et al., Nature Geoscience* (2009).

Costa Oeste de America, donde el afloramiento de aguas profundas subsaturadas está ejerciendo ya un impacto.



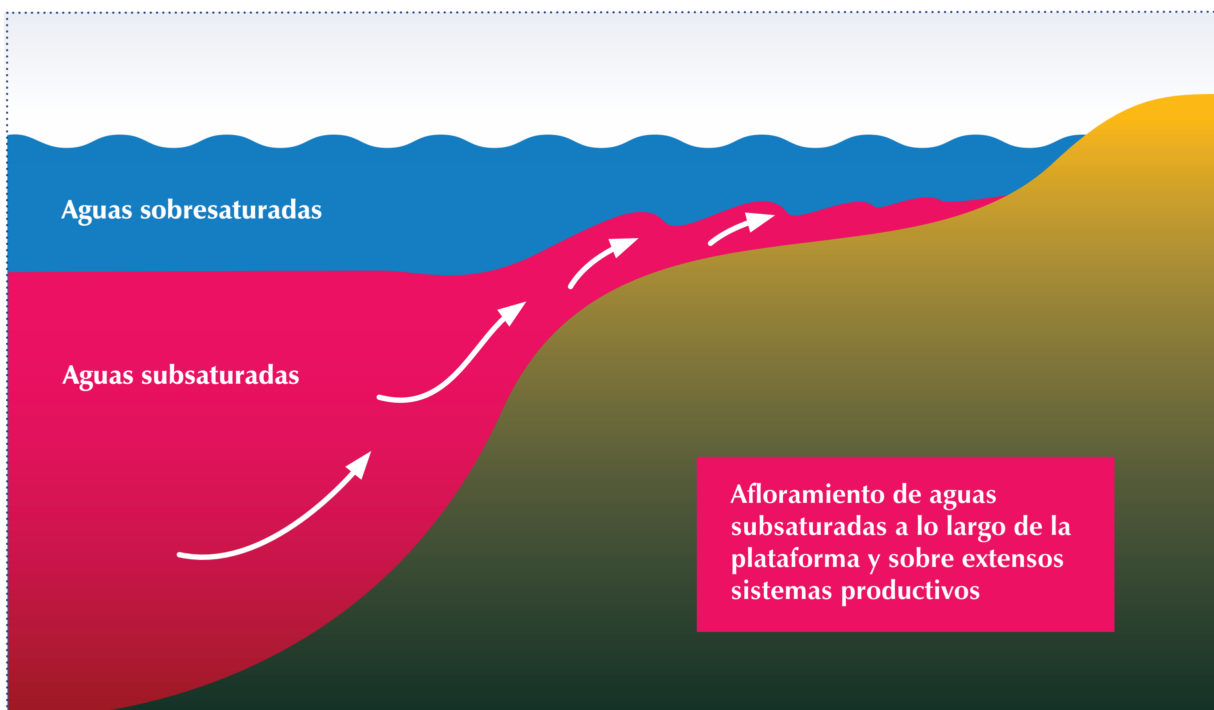
Photo © Dan Laffoley

Problemas del océano que afloran a la superficie

Las regiones costeras experimentan períodos de afloramiento en los que aguas profundas circulan a través de la plataforma continental hasta alcanzar regiones costeras. Esto expone ecosistemas someros productivos a aguas frías ricas en nutrientes, pero también con más contenido de CO_2.

Dado que la acidificación oceánica provoca que la capa de agua superior, supersaturada en carbonato, sea cada año más somera, estos eventos naturales de afloramiento favorecerán que las aguas subsaturadas alcancen más fácilmente la costa. Los organismos costeros que secretan conchas calcáreas no están acostumbrados a tales eventos y las exposiciones periódicas a estas condiciones tan distintas pueden afectar a estas comunidades. Los afloramientos de aguas subsaturadas ya están ocurriendo en la costa oeste de Norte América y es posible que comiencen a producirse en otros lugares donde las condiciones del mar lo permitan.

La invasión estacional de aguas subsaturadas, como la que está ocurriendo ya en la costa occidental de América del Norte, podría tener impactos graves en industrias importantes como la de la ostra.
Source after Carol Turley based on Feely *et al.*, *Science* (2008).



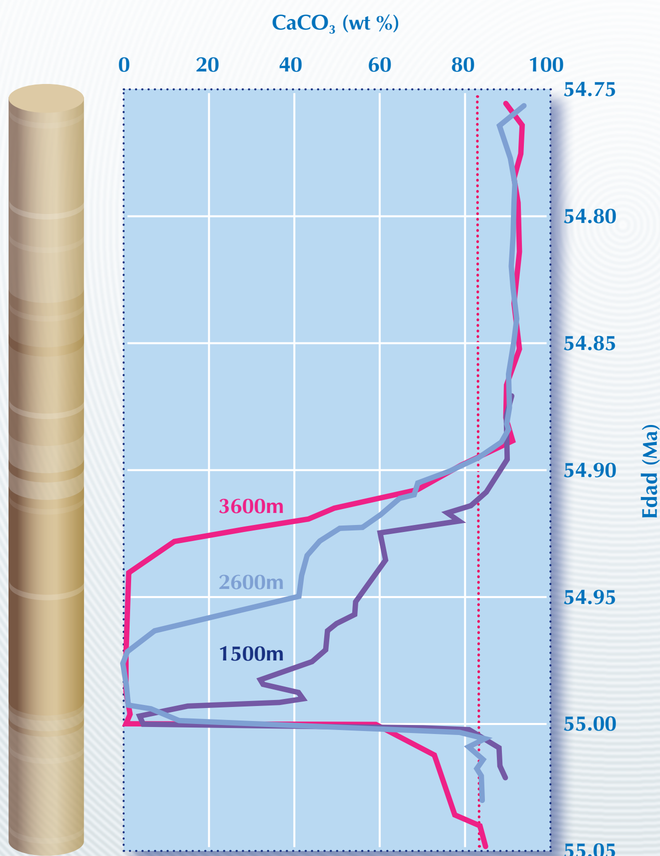
Aprendiendo de la historia

La química de los océanos de la Tierra no siempre ha sido constante y han existido periodos en el pasado durante los cuales el océano se ha acidificado. ¿Qué podemos aprender de estos acontecimientos pretéritos de acidificación? ¿Podemos utilizarlos para ayudar a predecir la gravedad de los impactos futuros derivados del actual episodio de acidificación oceánica?

¿Qué nos pueden enseñar los episodios de acidificación pretéritos?

En la historia reciente de la Tierra el equilibrio ácido-base del océano ha sido relativamente constante. Este conocimiento proviene tanto de la capacidad de medir indirectamente el pH del océano y calcularlo a partir de burbujas atrapadas en el hielo, como de examinar las condiciones pasadas a partir de los registros conservados en glaciares y sedimentos.

Los testigos profundos del Atlántico Sur para diferentes paleoprofundidades muestran cómo en la época del PETM el horizonte de saturación de calcita disminuyó 2 km su profundidad en unos pocos miles de años, y después se necesitaron 100000 años para recuperar los niveles pre-PETM. Este acontecimiento es potencialmente un factor que contribuyó a la extinción masiva de foraminíferos bentónicos durante esa época.
Source after Zachos *et al.*, *Science* (2005).



Las burbujas de aire atrapadas en los glaciares proporcionan un registro vital de las condiciones atmosféricas del pasado.


Photo © Ulf Riebesell, IFM-GEOMAR

Historia a partir del hielo

Las burbujas de aire atrapadas en las capas de hielo proporcionan un registro de los niveles pretéritos de CO_2 atmosférico, a partir de los cuales se puede calcular el pH del océano. Los testigos extraídos del hielo pueden 'leerse' de forma parecida a los anillos de los árboles: las capas superficiales reflejan las condiciones más recientes mientras que las más profundas fueron depositadas hace mucho tiempo. Estos testigos muestran que durante los últimos 800000 años, hasta mediados de los años 1800s, los niveles atmosféricos de CO_2 nunca superaron las 280 ppmv, mientras el pH del agua de mar se mantenía alrededor de 8,2. Actualmente, las concentraciones atmosféricas de CO_2 se sitúan en torno a 390 ppmv y el pH superficial del océano en 8,1.

Similitudes lejanas

Más atrás en la historia, existieron largos periodos y acontecimientos abruptos en los que el pH del océano estuvo situado incluso por debajo de los valores actuales. ¿Qué podemos aprender de estos episodios sobre los cambios a los que nos enfrentamos ahora? El acontecimiento más discutido en este sentido es el conocido como Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM), que tuvo lugar durante el Cenozoico, hace 55 millones de años. Durante este período, las temperaturas globales aumentaron alrededor de 6°C (11°F) en menos de 10000 años, con el consiguiente aumento del nivel del mar a medida que el océano se calentaba. Los niveles de CO_2 atmosférico también aumentaron, lo que provocó que las aguas supersaturadas en carbonato cálcico fueran mucho más someras. Este acontecimiento se desencadenó, muy probablemente, con la entrada, debida al calentamiento del océano, de gran cantidad de carbono en el sistema, que se oxidó en el agua de mar y formó CO_2 que se liberó hacia la atmósfera.

Este periodo podría ayudarnos a comprender lo que nos podría deparar el futuro. Aunque muchos organismos calcificadores bentónicos de aguas profundas murieron entonces, algunos afirman que, ya que las especies de la superficie sobrevivieron a las condiciones de hace 55 millones de años, se espera que ésto vuelva a suceder en el escenario actual de acidificación. El peligro de esta suposición es que ignora la diferencia fundamental entre

el PETM y la actualidad: estos eventos de acidificación oceánica abarcan escalas de tiempo muy diferentes. Actualmente, el proceso está teniendo lugar en unos pocos siglos, mientras que la inyección de CO_2 asociada con el PETM tuvo lugar a lo largo de más de 10000 años. Este episodio, aunque se produjo a un ritmo mucho más lento, ya afectó a los organismos del océano profundo, con lo cual es de esperar que la mayor velocidad del cambio actual les otorgue un menor tiempo de adaptación.

Grados de diferencia

La razón por la cual la situación actual difiere de manera tan marcada se debe, en gran parte, a la rápida tasa de cambio de los niveles atmosféricos de CO_2 en comparación con la lentitud de los procesos geológicos que eliminan el CO_2 de la atmósfera. La diferencia más importante es que en todos los eventos de acidificación de los últimos 65 millones de años, el CO_2 se añadió lentamente a lo largo de miles de años y en algunos casos cientos de miles de años de actividad volcánica. El océano tuvo tiempo para completar ciclos de mezcla a escala milenaria que conectaran las aguas superficiales con las profundas. Esto provocó que los sedimentos de carbonato del fondo marino se disolvieran y liberaran iones carbonato que contribuyeron, en parte, a neutralizar la acidez. El océano de hace millones de años también contenía concentraciones más altas de iones de calcio y magnesio que el actual, lo que facilitó la estabilización de los minerales calcáreos en los organismos, de forma que éstos fueron capaces de tolerar las condiciones ácidas mejor que los organismos del océano actual.

Hoy en día, los niveles atmosféricos de CO_2 están aumentando considerablemente más rápido que la velocidad a la que el agua del océano se puede mezclar, lo que favorece el desacoplamiento de ambos procesos. El resultado es que la mayor parte del CO_2 se acumula en una capa de agua de mar muy cercana a la superficie del océano. Aproximadamente, el 50% del CO_2 que hemos emitido reside en el 10% del océano más superficial. La capacidad de los sedimentos para regular la química marina y neutralizar la acidez es simplemente demasiado lenta- tiene lugar en una escala de tiempo de más de 1000 años- de forma que el pH del océano y la cantidad de iones carbonato disponibles están disminuyendo.

¿Puede el pasado ser una guía hacia el futuro?

Es posible comparar lo que está ocurriendo actualmente con lo que pasó hace muchos millones de años cuando el océano era más ácido. La acidificación hoy en día ocurre más rápido y en un grado mayor del que jamás se haya visto en el registro fósil durante los últimos 65 millones de años. Se estima, por ejemplo, que la acidificación del océano se está produciendo 10 veces más rápido que la que precedió la extinción hace 55 millones de años durante el Máximo Térmico Paleoceno-Eoceno, el acontecimiento de acidificación oceánica más grande desde la extinción de los dinosaurios. Testigos sedimentarios marinos del sudeste del Océano Atlántico muestran un cambio espectacular en su composición, debido a la disolución de los organismos de carbonato presentes en la arcilla. Este hallazgo es el resultado del incremento en los niveles de acidez que condujo a muchas especies del océano profundo, con cuerpos formados de carbonato cálcico, a la extinción. A partir del estudio de estos testigos, todo parece indicar que los océanos tardaron más de cien mil años en poder recuperarse.

Diez veces más rápido

A lo largo de la historia de La Tierra, la vida en el océano se ha recuperado de numerosos episodios de extinción repentinos gracias a la adaptación y evolución de nuevas especies, pero las escalas de tiempo necesarias para la extinción y la repoblación son de millones de años, no de unos pocos siglos. La acidificación oceánica producida por el hombre está afectando al océano de manera mucho más rápida que el ritmo de recuperación natural de la Tierra. La tasa actual de acidificación es 10 veces más rápida que cualquier otra experimentada desde la era de los dinosaurios, hace 65 millones de años.

Los arrecifes de coral situados en lugares como las Seychelles albergan una increíble diversidad de vida, y podrían resultar seriamente afectados hacia 2050 si la tasa actual de acidificación oceánica continúa.



Photo © Jerker Tamelander

La acidificación oceánica está ocurriendo 10 veces más rápidamente que la que precedió la extinción de muchas especies marinas hace 55 millones de años.

¿Podemos predecir la futura gravedad de la acidificación oceánica?

Es inevitable que los niveles de CO_2 atmosférico sobrepasen el nivel actual de 391 ppmv, y ésto seguirá disminuyendo el pH de la superficie del mar. Sin embargo, la velocidad y el alcance del futuro aumento son difíciles de predecir, debido a que dependen de si somos capaces de reducir nuestras emisiones de CO_2 y en qué medida. Si el aumento de CO_2 atmosférico continúa sin cesar, a finales del siglo XXI es posible que estas concentraciones alcancen las 800 ppmv y el pH del océano se vea reducido en 0,3 – 0,4 unidades, equivalente a un aumento de los iones hidrógeno en un 150 - 200%.

Menos certidumbre hay sobre los posibles impactos biológicos de la acidificación del océano, porque aún no hemos experimentado tales cambios y los diferentes grupos de organismos marinos pueden ser más o menos sensibles a los cambios en la química del agua de mar.

Recuperación de una muestra de una red de arrastre pelágico para pterópodos en la Antàrtida.



Photo © John M Baxter

Impactos en el ciclo de vida

Para muchos organismos marinos, sus gametos, fases larvarias, juveniles y adultos pueden verse afectados de manera diferente por la acidificación del océano; por tanto, es crucial considerar los impactos sobre la supervivencia y la reproducción a lo largo de todo su ciclo de vida. En general, los estudios sugieren que las fases tempranas (gametos, larvas y juveniles) podrían ser más sensibles a la acidificación oceánica. El estrés, por lo general, limita el funcionamiento de los organismos - por ejemplo, los organismos estresados crecen menos y más lentamente, los depredadores serán menos eficaces y las presas probablemente menos capaces de evitar su captura. En el caso de los adultos, el estrés causado por la acidificación del océano puede afectar a su comportamiento y en última instancia reducir sus tasas de crecimiento y reproducción. Incluso aunque los individuos sobrevivan, una reducción de la capacidad reproductora puede mermar su progenie de modo que las poblaciones se vean afectadas también.

Entre aquellas especies amenazadas por la acidificación del océano se encuentran los corales tropicales y profundos, el plancton calcáreo y los pterópodos de vida libre, debido a una mayor dificultad a la hora de

Corales – cuestiones complejas

El coral hospeda dentro de sus células diminutas algas unicelulares llamadas zooxantelas que, mediante su fotosíntesis, son una fuente importante de carbono para el coral y para su calcificación (estructuración del esqueleto). La relación coral-algas está en delicado equilibrio y si las algas proliferan demasiado y su número se incrementa excesivamente, la transferencia de carbono al coral hospedador puede verse interrumpida. Por tanto, aunque la fotosíntesis de las algas unicelulares se incrementase con altos niveles de CO_2, esto no beneficiaría necesariamente al coral anfitrión. Sin embargo, aun cuando los estudios han mostrado que la fotosíntesis de algunas especies de algas se ve favorecida por los niveles de CO_2 proyectados para el final de este siglo, en torno a las 700-800 ppmv, no se ha demostrado aún que la fotosíntesis de las zooxantelas aumente considerablemente al alcanzarse este nivel de CO_2. Los experimentos indican que en la mayoría de los casos hay una disminución de la tasa de calcificación del coral cuando los niveles de CO_2 aumentan; por tanto, es evidente que la subida de CO_2, en lugar de protegerlos, en realidad disminuye la capacidad de los corales para construir sus esqueletos y, por tanto, su capacidad para soportar tormentas. Esto indica que, tarde o temprano, el crecimiento será menor que la erosión natural y por tanto estos arrecifes terminarán desapareciendo.



Photo © Dan Laffoley

Los arrecifes de coral son ecosistemas vitales pero frágiles y extremadamente sensibles a la acidificación oceánica.

El cuento del bogavante

Un estudio experimental demostró que la masa del caparazón de varios crustáceos, incluido el bogavante, criados en cultivo durante 60 días, aumentaba con altos niveles de CO_2, mientras que en otro trabajo se observó una reducción en el crecimiento del caparazón de larvas de bogavante. Esto recalca la necesidad de estudiar el ciclo de vida completo así como la salud fisiológica de los organismos. A falta de más estudios, dos motivos principales indican que es prematuro afirmar que los crustáceos estarán “a salvo” de la acidificación del océano.

1) La producción del caparazón requiere energía, y cada organismo sólo tiene un presupuesto energético limitado; por tanto, el incremento de la masa de la concha tiene lugar casi con toda seguridad reduciendo la energía para otras funciones como el crecimiento y la reproducción. Estos factores no se tuvieron en cuenta en este estudio, luego los efectos de la acidificación oceánica sobre la salud y la longevidad de estos organismos son todavía desconocidos.



Photo © Sue Scott/SNH

Bogavante.

2) En comparación con moluscos y corales, los bogavantes (y crustáceos en general) presentan un tipo distinto de caparazón y un mecanismo diferente a la hora de engrosarlo. Los caparazones de bogavante son exoesqueletos que contienen una proporción elevada de quitina junto con minerales de carbonato cálcico, y se desprenden periódicamente en lugar de acumularse de modo continuo. Es conocido que los bogavantes, cuando se preparan para mudar, extraen muchos minerales del caparazón viejo y los retienen en sus cuerpos para depositarlos más tarde en el nuevo esqueleto.

En este momento no está claro cómo esta diferencia en el mecanismo de crecimiento afectará la respuesta de los bogavantes a la acidificación del océano.

Es probable que algas coralinas como *Lithothamnion tophiforme* estén entre los organismos más sensibles a la acidificación oceánica.



Photo © Armin Form, IFM-GEOMAR

construir y mantener sus esqueletos y caparazón. Estas especies juegan un papel clave en el océano, ya sea porque construyen estructuras tridimensionales, como arrecifes de coral, que hospedan una diversidad biológica considerable y actúan como protección costera, o bien por ser componentes clave de las cadenas tróficas y los ciclos biogeoquímicos marinos (p.ej. plancton calcáreo, pterópodos).

Vencedores y vencidos

El crecimiento y el nivel de fotosíntesis del fitoplancton marino y de ciertas especies de plantas pueden incrementarse con niveles más altos de CO_2, pero esto no es en ningún caso una regla general. Para la fisiología de otros organismos, los niveles elevados de CO_2 y la acidez creciente pueden tener efectos negativos o neutros. Por lo tanto, algunas especies marinas serán las ‘ganadoras’, otras serán las ‘perdedoras’, mientras que algunas no mostrarán ningún signo de cambio. Algunos experimentos realizados hasta la fecha sugieren que las nuevas especies de fitoplancton y plantas dominantes en el océano acidificado futuro, pueden ser menos capaces de sostener la productividad de las diversas cadenas tróficas de las que dependen actualmente la salud de los ecosistemas oceánicos y los recursos pesqueros.

Exponiendo las consecuencias

Photo © Jason Hall-Spencer



Lechos exuberantes de fanerógamas marinas desprovistas de epífitos crecen en aguas que tienen pH bajo de forma natural.

Aunque es difícil pronosticar con precisión las consecuencias de la acidificación del océano, debido a los múltiples interrogantes sobre el comportamiento humano y las respuestas de los ecosistemas marinos, podemos aprender de la historia cuál será el resultado probable, y observar las áreas del océano que han sido expuestas a una acidificación natural a largo plazo.

Las comunidades de organismos situadas en las emanaciones de aguas volcánicas frías y ricas en CO_2 del lecho marino (no las fumarolas extremadamente calientes de las profundidades oceánicas) con un pH inferior al previsto para las próximas décadas, muestran que ciertas especies de microalgas, macroalgas y fanerógamas puede crecer muy bien en tales áreas, pero en comparación con otras áreas similares, no sujetas a niveles de pH reducidos, la diversidad biológica total es más reducida y la corrosión de los caparazones es evidente.

¿Simplemente, no se adaptarán las especies a la acidificación del océano?

Es de esperar que si el pH del agua de mar y los niveles de carbonato continúan disminuyendo, habrá ‘ganadores’ y ‘perdedores’ en los ecosistemas marinos, pero es inevitable que las comunidades marinas cambien. Probablemente, los animales y plantas que inicialmente se verán afectados serán aquellos que presentan caparazones o esqueletos de carbonato cálcico. Los organismos pueden responder a cambios nocivos en su entorno mediante uno de estos tres modos: aclimatarse, adaptarse o extinguirse.

Proyecciones para el CO_2 atmosférico y el promedio global de la diferencia entre el pH superficial actual y los niveles preindustriales para distintios escenarios de emisión del IPCC 2007, con indición de algunos impactos biológicos determinados experimentalmente y de los años en que se espera que tenga lugar la primera subsaturación estacional localizada de aragonita.
Source after Turley *et al.*, *Marine Pollution Bulletin* (2010).

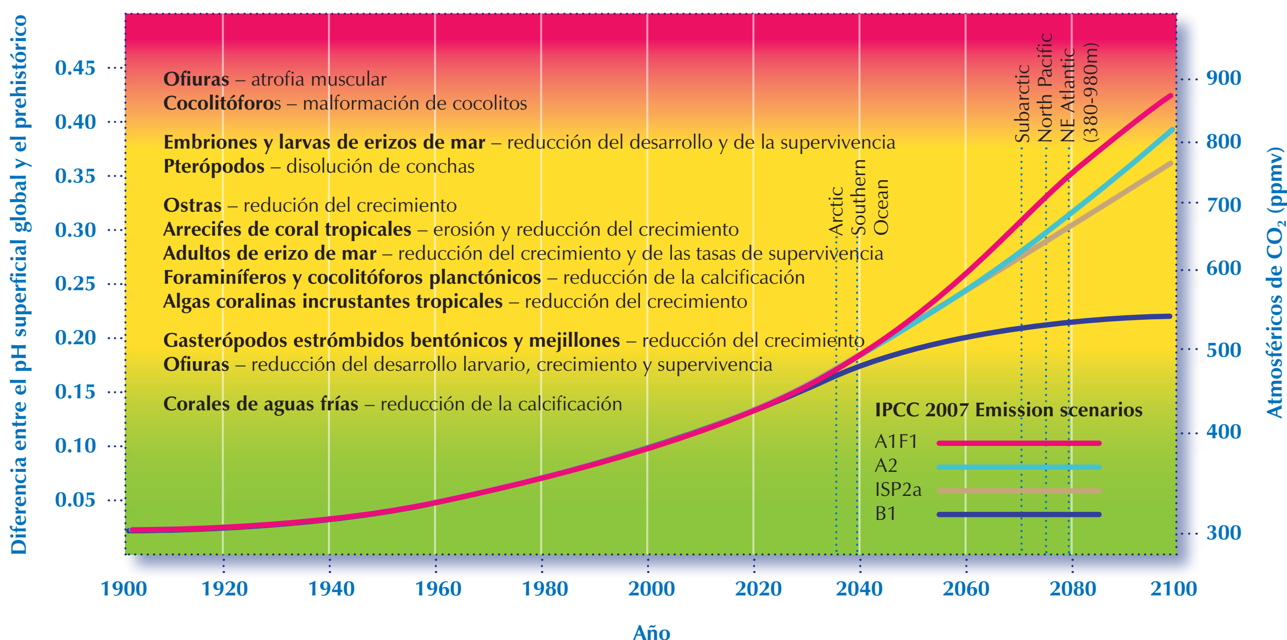


Photo © Jason Hall-Spencer

Mientras los niveles de pH y carbonato continúan descendiendo habrá 'ganadores' y 'perdedores'- pero el cambio es inevitable

Una comunidad de fondo en un area del Mar Mediterráneo con burbujas de CO_2 de surgencias volcánicas representa un laboratorio natural ideal para estudiar la acidificación oceánica.

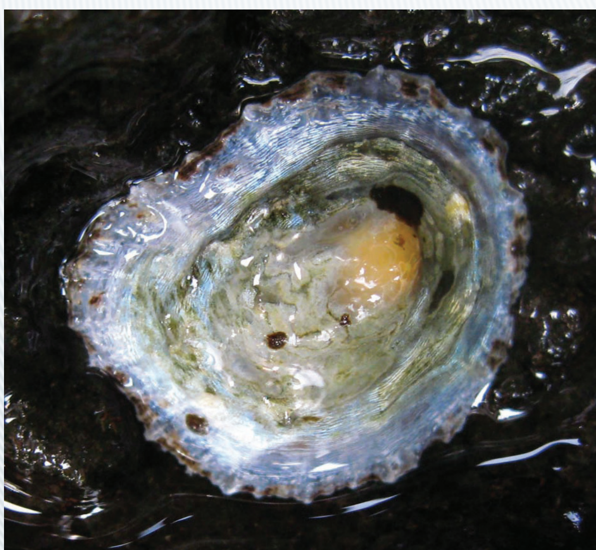
Laboratorios naturales con elevado CO_2

La mayor parte de las especies poseen alguna capacidad para aclimatarse. Todas las especies tienen una cierta aptitud para tolerar condiciones cambiantes, aunque el estrés producido por la alteración puede afectar a la capacidad de competencia en su entorno. La capacidad de un organismo para mantener sus actividades esenciales depende de su reserva energética. Si un organismo gasta más energía en el mantenimiento de su caparazón o esqueleto protector, tendrá menos energía disponible para otras funciones vitales como la reproducción o el crecimiento. Asimismo, si un organismo sin un caparazón consume más energía en la respiración y excreción de los desechos en un océano con alto CO_2 y bajo pH, puede disponer de menos energía para buscar el alimento u otras actividades de supervivencia importantes.



Concha de lapa seriamente erosionada en un área con CO_2 naturalmente elevado.

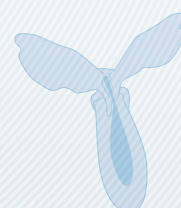
Photo © Jason Hall-Spencer



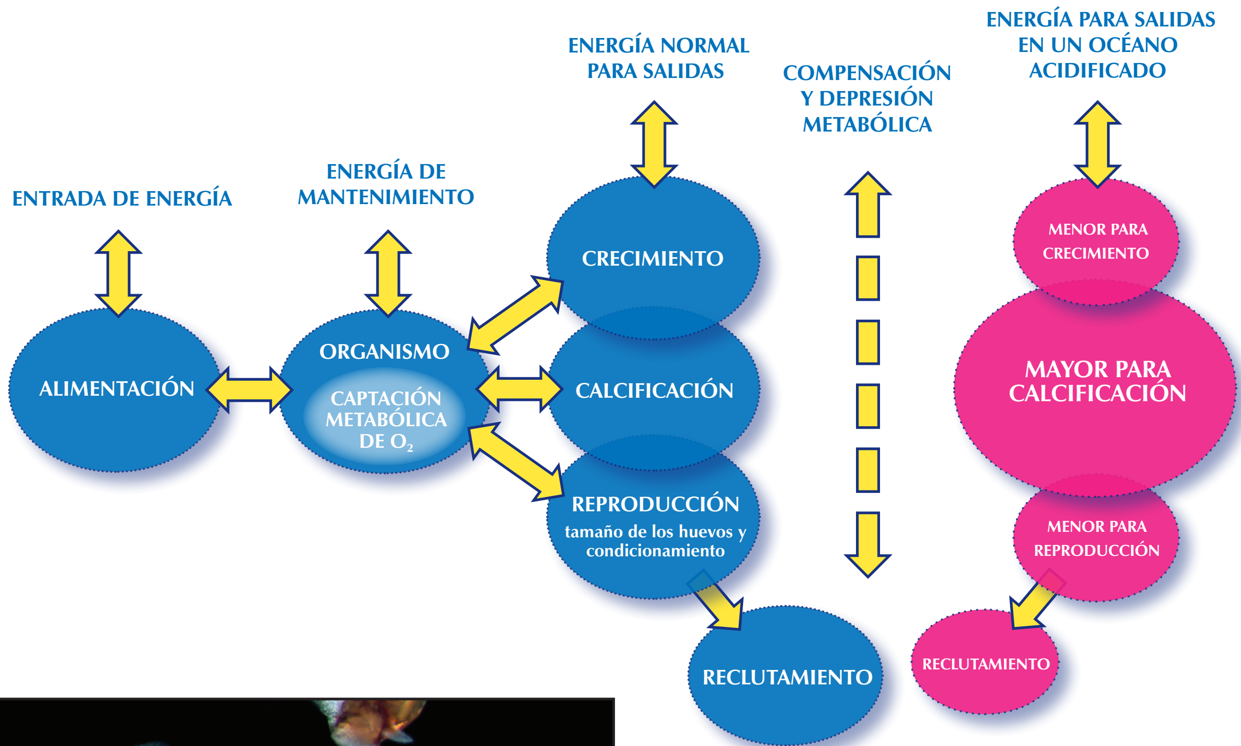
Pólipos de coral introducidos en un área de pH naturamente bajo que muestran la erosión de sus esqueletos calcáreos.

Photo © Jason Hall-Spencer





Procesos cruciales de supervivencia- ¿Cómo afectará la acidificación oceánica a la fisiología de los organismos?
Source after Carol Turley.



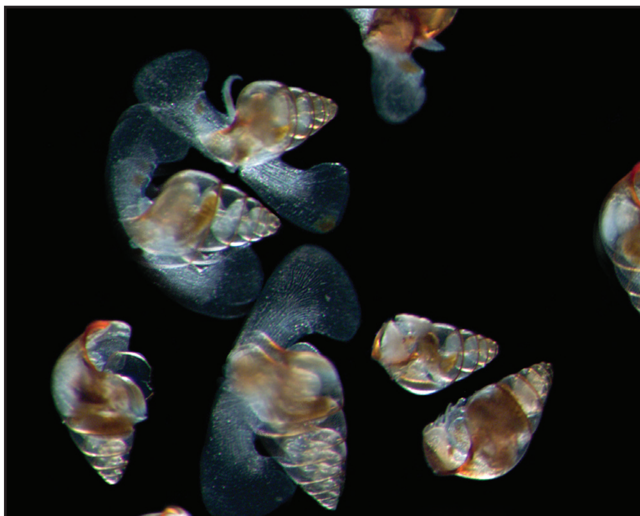


Photo © Hopcroft/UAF/COML

El pterópodo tropical *Limacina bulimoides.*

Velocidad del cambio

Las especies pueden adaptarse a los cambios ambientales con pequeñas variaciones genéticas que producen algunos individuos más aclimatados a las nuevas condiciones. Las especies con ciclo de vida corto tienen una capacidad potencial mayor para responder a los cambios ambientales rápidos debido a que sus tiempos de generación son reducidos, cada nueva generación experimenta condiciones sólo ligeramente diferentes a las anteriores y existe un mayor número de individuos que pueden desarrollar variaciones favorables. En comparación, las especies con ciclo de vida largo tienden a tene una capacidad mucho menor para adaptarse rápidamente. Sin embargo, los cambios que ya se han observado en el grosor del caparazón de pterópodos, que presentan un ciclo de vida anual, indican que incluso para especies con un ciclo de vida relativamente corto, la velocidad actual de disminución del pH del océano puede ser demasiado rápida para que sean capaces de adaptarse. Se necesita más investigación para confirmar esta cuestión.

Acontecimientos anteriores de acidificación en el registro geológico están a menudo asociados con la extinción de muchas especies. Mientras que la causa de tales episodios de extinción es a menudo compleja, es notable que la recuperación llevó cientos de miles y, en el caso de extinciones masivas, millones de años.

¿Una carrera armamentística de acidificación?

La pregunta clave no es si la vida del océano se adaptará y se desarrollará en respuesta a la acidificación del océano. Lo que es cuestionable es su capacidad de adaptarse y desarrollarse suficientemente ante la 'rápida' acidificación del océano, de tal modo que las 'nuevas' comunidades que surjan sean capaces de proporcionar los mismos servicios y bienes esenciales que usamos y nos mantienen.

¿Mantener el ritmo de cambio?

La evidencia de la distribución actual de los arrecifes de coral es que está relacionada con el estado de saturación de los océanos con respecto al aragonito y que se podrían mantener con el paso de las condiciones de cambio natural. Es sumamente improbable que estos corales puedan ser capaces de adaptarse a la aceleración en el cambio de condiciones que se predice para las próximas décadas.

Comprendiendo nuestras opciones

Los efectos de la acidificación del océano se incrementarán paulatinamente y aunque los impactos que ya son evidentes parecen ser relativamente leves, continuarán aumentando junto con la tasa de acidificación. Además, dado que existe un retraso entre las emisiones de CO_2 y el alcance de un estado de equilibrio, aunque las emisiones alcanzaran un máximo y posteriormente se redujeran, el pH del océano continuaría cayendo durante algún tiempo. Una disminución de los niveles de CO_2 atmosféricos es esencial si queremos primero reducir, y después detener la acidificación del océano antes de que sea demasiado tarde.

El uso de combustibles fósiles continúa aumentando los niveles atmosféricos de CO_2.



Photo ©Bec Thomas Photography 2006-2007/Marine Photobank

¿Podría marcar la diferencia el recorte de emisiones de CO_2?

Durante los últimos 250 años, los niveles de CO_2 atmosférico han aumentado en casi un 40 % desde las 280 ppmv a las 391 ppmv de hoy en día, y este nivel continúa incrementándose en aproximadamente 2 ppmv por año. Los niveles de CO_2 atmosférico han sido atenuados por la absorción de una parte del CO_2 por el océano (lo que ha causado su acidificación); de otra manera rondarían actualmente en las 460 ppmv, un nivel que habría conducido a un cambio climático aún mayor.

Reversible a largo plazo

Aunque ya estamos viendo cambios en la química del agua del océano como consecuencia de la absorción de CO_2 atmosférico y los impactos derivados de ello sobre los ecosistemas marinos, estos cambios son reversibles a largo plazo. Sin embargo, cualquier inversión dependería de una reducción significativa de los niveles de CO_2 atmosféricos durante un período prolongado de tiempo. Disminuir las emisiones de CO_2 procedentes de la combustión de combustibles fósiles, la fabricación de cemento y la deforestación, son los únicos métodos realistas para alcanzar tal reducción.

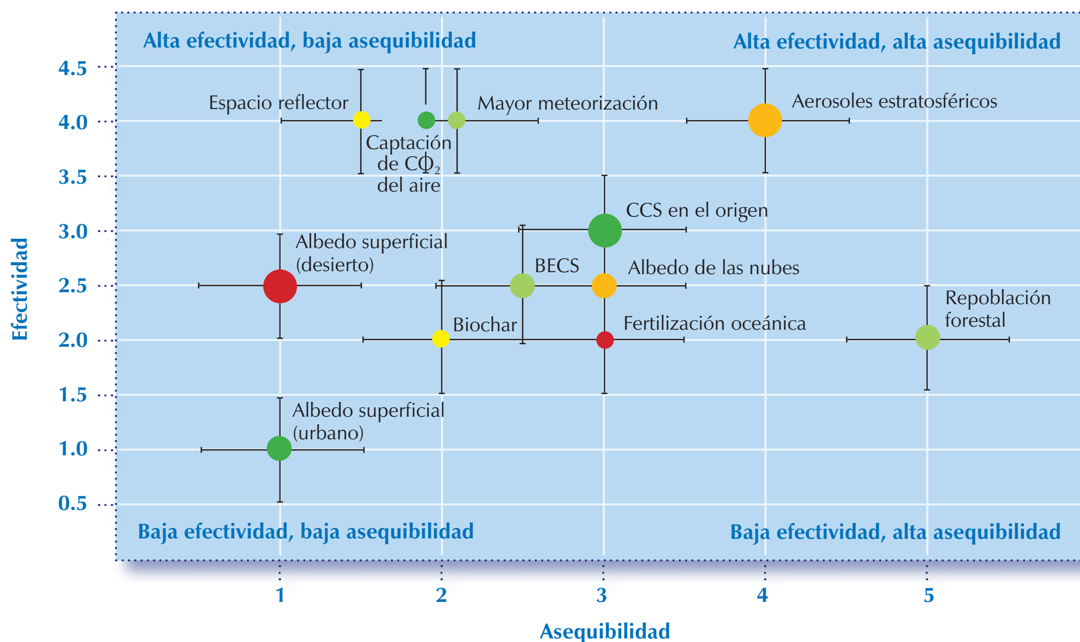
Se prevé que el nivel en que las concentraciones atmosféricas de CO_2 alcancen su punto máximo estará muy por encima de las 400 ppmv y los efectos sobre el pH del océano seguirán viéndose durante un tiempo considerable, incluso después de lograrse una reducción en los niveles de CO_2 atmosféricos. El CO_2 absorbido por las aguas superficiales del océano seguirá penetrando en el océano profundo durante los próximos siglos.



Photo © Johannes Förster

La interrupción de la deforestación ayudaría a reducir la tasa de aumento de los niveles de CO_2 atmosféricos.

Existen actualmente pocas opciones de geoingeniería para la lucha contra el cambio climático que sean a la vez altamente efectivas y asequibles. Sólo la captura y el almacenamiento de carbono (CCS) tendrían un impacto en los niveles de CO_2 atmosféricos. Un punto verde indica una opción más segura frente a otras más arriesgadas marcadas con un punto rojo; el tamaño del punto indica su grado de oportunidad (grande si son rápidamente aplicables y efectivas, pequeño si no lo son). Las barras negras indican el grado de incertidumbre relativo a su asequibilidad (horizontal) y a su eficacia (vertical). Source after The Royal Society *Geoengineering the Climate* (2009).



El desarrollo de tecnologías energéticas renovables marinas es vital para contribuir a la reducción de emisiones de CO_2 procedentes de la quema de combustibles fósiles.



Photo © John M Baxter

No es demasiado tarde

Algunos cambios derivados de la acidificación del océano ya están siendo observados y otros son probables, incluso si se toman acciones rápidas para limitar y reducir considerablemente los niveles de CO_2 en la atmósfera durante los próximos años. No es demasiado tarde para tratar de minimizar los daños. Los medios tecnológicos y económicos que permiten reducir significativamente las emisiones de CO_2 están disponibles si decidimos hacerlo. Cuanto más tiempo tardemos en actuar, mayor será el impacto final, y más largo será el legado de la acidificación oceánica.

¿Podemos solventar la acidificación oceánica con geoingeniería?

El concepto de la geoingeniería es la manipulación deliberada del clima de la Tierra. La mayoría de enfoques de geoingeniería proponen limitar los impactos del cambio climático tratando de mitigar los síntomas sin abordar el problema de raíz – el exceso de CO_2 atmosférico. No tienen en cuenta las consecuencias de las emisiones químicas como tales. Por ejemplo, las estrategias que tratan de enfriar la Tierra reflejando la luz solar al Espacio tendrían escaso efecto directo sobre la química del océano y, por tanto, no disminuirían significativamente la amenaza que plantea la acidificación de los océanos.

Consecuencias desconocidas

Se han elaborado algunas propuestas para disminuir los cambios en la química oceánica mediante la adición al océano de compuestos químicos que neutralizarían los ácidos. El principal problema con estos enfoques es que la cantidad de material que habría que añadir es muy grande. De hecho se ha calculado que la cantidad que se necesitaría es algo mayor que el tonelaje de CO_2 que ya hemos emitido a la atmósfera. Por lo tanto, estas soluciones propuestas requerirían de una nueva e importante infraestructura minera y de procesamiento químico con consecuencias ambientales desconocidas.

También se ha sugerido que la fertilización del océano podría ayudar a reducir el cambio climático y la acidificación oceánica. La fertilización podría estimular el crecimiento del fitoplancton, lo que se traduce en un aumento neto de la captación biológica de CO_2 atmosférico. La disminución de la concentración de CO_2 en la atmósfera próxima a la superficie del océano reduciría la concentración de carbono inorgánico disuelto en la superficie. Los modelos del ciclo global del carbono oceánico predicen que, con emisiones constantes de CO_2 a la atmósfera, la fertilización del océano tendría un efecto moderado de mitigación de la acidificación del océano cerca de la superficie, pero podría causar acidificación en el océano profundo, debido al hundimiento de partículas orgánicas que serían descompuestas de nuevo en CO_2 a mayores profundidades. Si las emisiones de CO_2 a la atmósfera continúan aumentando, las profundidades del océano seguirán acidificándose. La escala y la longevidad de los esfuerzos que serían necesarios para tales enfoques tendrían un costo prohibitivo, y en el mejor de los casos, los beneficios serían mínimos.

Prevenir mejor que curar

Muchos observadores han concluido que los recursos que se pueden dedicar a la geoingeniería podrían aplicarse mejor a la transformación de nuestro sistema energético – evitando la entrada de CO_2 en el ambiente en lugar de intentar neutralizar sus efectos después de que ya se haya propagado por la atmósfera y los océanos.

Guía en línea

Descárguese una copia de esta nueva guía sobre acidificación oceánica y aprenda más sobre este tema en: http://www.epoca-project.eu/index.php/Outreach/RUG/

¿Qué es el Grupo de Usuarios de Referencia sobre Acidificación Oceánica?

Es fundamental asegurarse de que la ciencia de vanguardia sobre temas como la acidificación oceánica plantee las preguntas adecuadas y de que las respuestas lleguen de forma rápida y efectiva a manos de los asesores y gestores responsables de planificar las actuaciones necesarias. El Grupo de de usuarios de Referencia sobre Acidificación Oceánica (RUG) se basa en experiencia del Reino Unido y otros países de Europa y del mundo para fomenar un rápido intercambio de información entre científicos y usuarios finales.

El RUG se estableció en 2008 para apoyar el trabajo del Proyecto Europeo sobre Acidificación Oceánica (EPOCA), y ahora también apoya estudios complementarios en Alemania (BIOACID) y el Reino Unido (el Programa de Investigación en Acidificación Oceánica del reino Unido; en inglés, the UK Ocean Acidification Research Programme), fuertemente vinculados con procesos similares en los Estados Unidos. El RUG agrupa una amplia gama de usuarios para apoyar el trabajo de los principales científicos dedicados a la acidificación oceánica, para facilitar la trasferencia rápida de conocimiento y para contribuir a un aporte efectivo de ciencia de calidad.

Esta guía se basa en la experiencia del RUG, junto con los conocimientos de los principales expertos en acidificación oceánica, para proporcionar una introducción a asesores y gestores sobre esta cuestión tan crítica y urgente.

El RUG está formado por representantes de: Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research, BP, Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CNRS), Canadian Tourist Industry Authority, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Climate Central (Princeton University), Conservation International, Department for Food, Environment and Rural Affairs (Defra), Department of Energy and Climate Change (DECC), Directorate of Fisheries (Norway), European Science Foundation (ESF), Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Greenpeace, International Atomic Energy Agency, International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), International Union for the Conservation of Nature (IUCN), Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environment (LSCE), Leibniz Institute of Marine Sciences (IFM – GEOMAR), Marine Institute (Ireland), Natural England, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), Plymouth Marine Laboratory (PML), Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Rolls Royce, Royal Institution, Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR), Scottish Natural Heritage (SNH), Shellfish Association of Great Britain (SAGB), Stockholm Resilience Center, The Nature Conservancy, UK Climate Impacts Programme (UKCIP), UNEP World Conservation Monitoring Center, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), The Worldwide Fund for Nature (WWF).

Observadores

European Commission, the UK Marine Climate Change Impacts Partnership, the Oak Foundation, Oceana.

Más detalles y contactos

Más detalles sobre el trabajo del Grupo de Usuarios de Referencia sobre Acidificación Oceánica y el Proyecto Europeo sobre Acidificación Oceánica se pueden encontrar en el sitio web:

http://www.epoca-project.eu/index.php/Outreach/RUG/
y sobre el programa del Reino Unido en www.oceanacidification.org.uk

Para BIOACID visite http://www.bioacid.de/

Si tiene más consultas contacte con nosotros a través de:
policyguide-epoca@obs-vlfr.fr

EPOCA
European Project on OCean Acidification

BIOACID
Biological Impacts of Ocean ACIDification

UK Ocean Acidification Research Programme

MedSeA

PRINCE ALBERT II OF MONACO FOUNDATION

Institut océanographique
Fondation Albert I[er], prince de Monaco
Paris • Monaco

Scottish Natural Heritage
All of nature for all of Scotland

COOPERATION

NATURAL ENGLAND

IUCN

WCPA
WORLD COMMISSION ON PROTECTED AREAS

CENTRE SCIENTIFIQUE DE MONACO

Living With Environmental Change

DEPARTMENT OF ENERGY & CLIMATE CHANGE

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL

defra
Department for Environment Food and Rural Affairs

Fuentes y contribuidores

Este documento parte de *Preguntas Frecuentes sobre Acidificación Oceánica*, www.whoi.edu/OCB-OA/FAQs que representa el consenso más avanzado con respecto a las respuestas a 37 preguntas detalladas. Los siguientes científicos contribuyeron a ese documento:

Jim Barry, Senior Scientist, Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA

Jelle Bijma, Biogeochemist, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Germany

Ken Caldeira, Senior Scientist, Carnegie Institution for Science, USA

Anne Cohen, Research Specialist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Sarah Cooley, Postdoctoral Investigator, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Scott Doney, Senior Scientist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Richard A. Feely, Senior Scientist, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Helen Findlay, Lord Kingsland Fellow, Plymouth Marine Laboratory, UK

Jean-Pierre Gattuso, Director of Research, Centre National de la Recherche Scientifique and Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France

Jason Hall-Spencer, Marine Biology Lecturer, University of Plymouth, UK

Michael Holcomb, Postdoctoral Research Associate, Centre Scientifique de Monaco, Monaco

David Hutchins, Professor of Marine Environmental Biology, University of Southern California, USA

Debora Iglesias-Rodriguez, Lecturer, National Oceanography Centre of the University of Southampton, UK

Robert Key, Research Oceanographer, Princeton University, USA

Joan Kleypas, Scientist III, National Center for Atmospheric Research, USA

Chris Langdon, Associate Professor, University of Miami, USA

Daniel McCorkle, Associate Scientist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

James Orr, Senior Scientist, Laboratory for the Sciences of Climate and Environment, France

Hans-Otto Pörtner, Professor, Alfred Wegener Institute, Germany

Ulf Riebesell, Professor for Biological Oceanography, Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR, Germany

Andy Ridgwell, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Christopher L. Sabine, Supervisory Oceanographer, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Daniela Schmidt, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Brad Seibel, Assistant Professor of Biological Sciences, University of Rhode Island, USA

Carol Turley, Senior Scientist, Plymouth Marine Laboratory and KE Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Steve Widdicombe, Benthic Ecologist, Plymouth Marine Laboratory, UK

Richard Zeebe, Associate Professor, University of Hawaii at Manoa, USA

Garantía de calidad

Además estamos agradecidos a los científicos siguientes, que asesoraron específicamente sobre el desarrollo de este informe:

Jelle Bijma, Biogeochemist, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Germany

Humphrey Crick, Principal Specialist - Climate Change, Chief Scientist's Team, Natural England, UK

Sarah Cooley, Postdoctoral Investigator, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Richard A. Feely, Senior Scientist, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Jean-Pierre Gattuso, Director of Research, Centre National de la Recherche Scientifique and Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France

Lina Hansson, EPOCA Project Manager, Laboratoire d'Oceanographie, Villefranche-sur-mer, France

Dorothée Herr, Marine Programme Officer, Global Marine Programme, IUCN, Washington, USA

Michael Holcomb, Postdoctoral Research Associate, Centre Scientifique de Monaco, Monaco

Andy Ridgwell, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Ulf Riebesell, Professor for Biological Oceanography, Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR, Germany

Donna Roberts, Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre, Australia

Daniela Schmidt, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Carol Turley, Senior Scientist, Plymouth Marine Laboratory and KE Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Ed Urban, Scientific Committee on Oceanic Research, University of Delaware, USA

Phil Williamson, Science Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

También agradecemos a aquéllos que proporcionaron las traducciones a varios idiomas:

Arabic: Haifa Abdulhalin, edited by Nashat Hamidan and reviewed by Khaldoun Alomari.
Chinese: Vera Shi, Hui Lui, Guang Gao and Kunshan Gao.
French: Stéphanie Reynaud, Eric Béraud, François Simard and Jean-Pierre Gattuso. Pierre Gattuso and Lina Hansson.
Spanish: Juancho Movilla, Elisa Fernandez-Guallart, Carles Pelegero and Marta Estrada.

Les damos gracias a todos por ayudarnos a difundir esta información más allá de los angloparlantes.

Por favor citen este documento como: Ocean Acidification Reference User Group (2010). Ocean Acidification: Questions Answered. Laffoley, D. d'A., and Baxter, J.M. (eds). European Project on Ocean Acidification (EPOCA). 24 pp.

Esta guía se produjo con soporte financiero del Fundación Principe Alberto II de Mónaco, Patrimonio Natural Escocés, Inglaterra Natural, IUCN, EPOCA y el UK Ocean Acidification Research Programme, y está basado en las propuestas de buenas prácticas para la comunicación desarrolladas por el Consorcio del reino Unido sobre Impactos Marinos del Cambio Climático.

FSC

Designed by Ian Kirkwood www.ik-design.co.uk